# 现场实测岩体声衰减探讨

李锡润 金银东 易南概

(东北工学院 采矿系)

1988 年 8 月 24 日收到

判断工程岩体,特别是矿山岩体的稳定性一直是为人们所关注的问题之一。声测是判断岩体稳定的一种重要手段.理论和实验表明岩体声衰减对岩体稳定性比声速更加敏感.

实验室测量岩石声衰减比较容易做到,而现场测量则较为困难. 笔者利用单板机作为现场测量仪器. 在测量中,充分表现出单板机的便携、实用、方便、结果可靠等优点. 文中还从理论到实践解决了测试方法和计算方法等问题,并对用声衰减估计岩体稳定性作了初步评价.

### 一、前 言

无数的矿山生产实践和科学实验都证明了 矿山岩体的稳定性与岩体的宏观结构和微观结 构有关<sup>(11</sup>. 宏观结构是指岩体中的各种地质结 构面,微观结构是指岩石的原生微裂隙、孔隙和 采矿生产活动引起的新生裂隙等. 宏观、微观 结构愈发育,岩体的稳定性愈差. 声学理论和 科学实验都指出,介质中宏观、微观结构愈发 育,声波的衰减愈大<sup>(2)</sup>. 因而有可能利用声波 衰减来判别岩体的稳定性. 若此项工作得以顺 利实现,无疑会给矿山生产带来巨大经济效益.

过去由于现场测量仪器和测试方 法 不 完 善, 岩体声波衰减的测量工作进展不大. 笔者 在张家洼等矿进行了岩体声波衰减的品质因数 测量工作尝试,取得一些进展. 现将实测方法 和结果总结如下,以供参考.

### 二、测试系统和测试方法

声波衰减测试系统如图 1 所示. 先将两个 19kHz 的声波换能器固定于岩壁上,作为声波 信号接收点. 用锤击岩壁作为声波发射源. 锤 和两个换能器同在一直线上. 锤击同时向单板 机输入触发信号,使单板机开始对声波信号取 样. 换能器接收的声波信号,经放大器放大再



图 1 声波衰减测试系统图 1.换能器 1; 2.换能器 2; 3.放大器; 4. A/D 板; 5.单板机; 6.打印机; 7.电源.

进入 A/D 转换器,最后进入单板机. 由打印机 打印测得的声波信号. 锤击触发信号由 1.5V 干电池提供.

根据现场实测结果,锤击岩壁产生的声波 主频在 1-2kHz 之间,信号上限频率为 5kHz 左右. 单板机采样频率为 10.989kHz. 由于 10.989 > 2 × 5,满足采样定律,可以忽略单板 机采样引起的测试误差.

### 三、岩体品质因数计算原理

锤击在岩壁上产生振动脉冲,该脉冲以波 动形式向外传播.设换能器1接收到并由仪器 放大采集后的时域数字化波形为 g<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, t),换 能器2接收到并由仪器放大采集后的时域数字

应用声学

算品质因数Q有以下三种方法。

1. 利用  $g_1(x_1,t), g_2(x_2,t)$  的全波列振幅 谱计算0值

 $g_1(x_1, t)$  经 FFT 变换,得到的全波列振幅 谱可表示为[3]

 $A_1(x_1, f) = K_1 \cdot G_1 \cdot A_{r1}(f) \cdot e^{-t_1^* \cdot f} \quad (1)$ 式中 K1——包括换能器 1 的机电转换参数,通 道1的放大倍数,换能器与岩壁间的耦合系数; G1----包括介质声场扩散,界面透射或反射常 数; An(f)----包括声源振幅谱及仪器频响的 影响。

$$t_1^* = \frac{\pi \cdot x_1}{Q \cdot v} \tag{2}$$

 $x_1$ ——声源到换能器1的距离; Q——品质因 数; v---被测岩体声速; f---频率。 同理,  $g_2(x_2, t)$  经 FFT 变换得到的全波列振幅谱可 表示为

 $A_{2}(x_{2}, f) = K_{2} \cdot G_{2} \cdot A_{r^{2}}(f) e^{-t_{2}^{*}f} \quad (3)$ 式中脚标 2 表示通道 2, 其余符号 意义同式 (1). 若取 A<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, f) 与 A<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>, f) 比的对数, 有

$$\ln \frac{A_{1}(x_{1}, f)}{A_{2}(x_{2}, f)} = (t_{2}^{*} - t_{1}^{*})f + \ln \frac{K_{1}}{K_{2}} + \ln \frac{G_{1}}{G_{2}} + \ln \frac{A_{r1}(f)}{A_{r2}(f)}$$
(4)

在上式中,假若两个通道传输特性一致,即  $A_{r1}(f) = A_{r2}(f)$ (5)

式(4)可减化为

$$\ln \frac{A_{1}(x_{1}, f)}{A_{2}(x_{2}, f)} = (t_{2}^{*} - t_{1}^{*})f$$

$$+ \ln \frac{K_{1}}{K_{2}} + \ln \frac{G_{1}}{G_{2}}$$
(6)

式(6)为一直线方程.其中 $\ln \frac{A_i(x_i, f)}{A_i(x_i, f)}$ 为f的 函数, f 为自变量,  $(t_2^* - t_1^*)$  为直线斜率,  $\ln \frac{K_1}{K_1} + \ln \frac{G_1}{G_1}$  为直线的截距. 经 FFT 变换后,  $A_1(x_1, f), A_2(x_2, f), f$ 为已知值,故可得到直 线斜率(パーパ),再由式(2)计算出の值。 在张家洼等矿实测到时域信号 g<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>,t) 和

• 12 •

化波形为 g<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>, t). 由 g<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, t) 和 g<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>, t) 计 g<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>, t), 经 FFT 变换 后, 得 到 频 域 信 号  $A_1(x_1, f)$ 和  $A_2(x_2, f)$ . 由数组

$$\left(\ln\frac{A_1(x_1,f)}{A_2(x_2,f)},f\right)$$

用描点法作图,得到的是一条波动曲线,而不是 类似于式(6)的一条直线。其原因估计是全波 列包络含直达波和续至波两部分。续至波组中 包含界面的及岩体结构面的折射波,致使式(5) 不成立,进而式(6)亦不成立、因而不能用全波 列振幅谱计算 Q 值. 在时域信号中,无法准确 区分直达波和续至波,因而无法利用振幅谱计 算直达波的Q值.

#### 2. 利用初至波第一个周期计算 Q值

在实验室中测试试件的声波品质因数 Q 值 时,多使用初至波第一个周期计算Q值。但在 现场岩体中,测得的初至波幅度值往往很小,不 易判读,且有丢波的可能。因而不宜在现场测 试中使用初至波的第一个周期计算Q值.

#### 3. 利用能量法计算岩体的 Q值

按能量法,岩体的声波品质因数定义为声 波传播一个波长时能量损失的 2π 倍,即

$$Q = 2\pi \frac{E_1}{\Delta E} \tag{7}$$

能器相距一个波长时,二通道声波能量;  $\Delta E =$  $E_1 - E_2$ .

受到介质衰减的单频波可表示为

$$g(x,t) = A_0 e^{-\alpha x} e^{j(wt-kx)}$$
(8)

式中 Ao----振幅; a----衰减系数; w----角 频率;  $k \rightarrow -iz$ 数. 声波在  $x_1$  点的能量  $E_1$  可 表示为

$$E_1 = B e^{-2\alpha x_1} \tag{9}$$

声波在 x2 点的能量 E2 可表示为

$$E_2 = B e^{-2\alpha x_2} \tag{10}$$

由式(9)、(10)得到声波能量损失比

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{B(e^{-2ax_1} - e^{-2ax_2})}{Be^{-2ax_1}}$$
$$= 1 - e^{-2a(x_2 - x_1)}$$
(11)

将式(11)中右边第二项用级数展开,当α较小 时,可取前一项,舍去余项44得到

#### 8 卷 4 期

$$\Delta E/E_{1} = 1 - [1 - 2\alpha(x_{2} - x_{1})]_{i}$$
  
= 2\alpha(x\_{2} - x\_{1})  
\(\mathbf{x}\_{2} - x\_{1})\)\(\mathbf{H}\) x\_{0} \(\mathbf{k}\)\overline, \(\mathbf{M}\)\)\(\mathbf{M}\)  
\(\Delta E/E\_{1} = 2\alpha x\_{0} \) (12)

因此,当两个换能器相距  $x_0 \neq \lambda$ ,品质因数 Q 可 近似表示为

$$Q = 2\pi \cdot \frac{x_0}{\lambda} \cdot \frac{E}{\Delta E}$$
(13)

前已述及, 仪器接收到的全波列数字化波 形为 g<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, t)和 g<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>, t),按声波的能量定义, 两列波能量分别可表示为

$$E_{1} = B \sum_{i=0}^{n} g_{1}^{2}(x_{1}, i \cdot \Delta t) \qquad (14)$$

$$E_2 = B \sum_{i=0}^{n} g_2(x_2, i \cdot \Delta t)$$
 (15)

式中 B——计算常数; i——单板机数据采集取 样点数,  $i = 0, 1, 2, \dots n$ ;  $\Delta t$ ——取样间隔.

若  $g_1(x_1, t)$  和  $g_2(x_2, t)$  为真实波形,则可 利用式 (13)、(14)、(15) 计算 Q 值. 但由于换 能器 1、2 的耦合条件不同,机电转换系数不同, 通道 1、2 的实际放大倍数可能不同, $g_1(x_1, t)$ 和  $g_2(x_2, t)$  可分别表示为

$$g_1(x_1, t) = K_1 \cdot f_1(x_1, t)$$
 (16)

$$g_2(x_2, t) = K_2 \cdot f_2(x_2, t)$$
 (17)

式中 f<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, t) 和 f<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>, t) 分别为真实波形, K<sub>1</sub>、 (K<sub>2</sub> 见式 (1), (3). 在实测中, K<sub>1</sub>和 K<sub>2</sub>均为未 知,因此,在式 (13) 中必须消除 K<sub>1</sub>和 K<sub>2</sub>的影 响.

在张家洼等矿实测中,采取了下述方法消除 K<sub>1</sub> 和 K<sub>2</sub> 的影响,即换能器不动,在换能器的两侧分别设置声源,如图 2 所示.



左侧设置声源时,由式(13)可知, Q<sup>-1</sup>可表示为

$$Q^{-1} = c \cdot \frac{E_1 - E_2}{E_1} = c \cdot \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) (18)$$

式中  $c = \lambda/2\pi x_0$ ,  $x_0$  为两个换能 器 之 间 距。 同理,右侧设置声源时,有

$$Q^{-1} = c \cdot \left(1 - \frac{E_4}{E_5}\right) \tag{19}$$

式 (18)、(19) 之积为  

$$(Q^{-1})^2 = c^2 \left[ 1 - \left( \frac{E_2}{E_1} + \frac{E_4}{E_3} \right) + \frac{E_2 E_4}{E_1 E_3} \right] (20)$$

式(18)、(19)之和为

$$-\left(\frac{E_2}{E_1} + \frac{E_4}{E_3}\right) = \frac{2}{c} \cdot Q^{-1} - 2 \qquad (21)$$

将上式代入式(20),整理后得到

$$(Q^{-1}-c)^2 = c^2 \frac{E_2 E_4}{E_1 E_3}$$
(22)

解上式,得到

$$Q^{-1} = \begin{cases} c \cdot \left(\frac{\sqrt{E_1 E_3} + \sqrt{E_2 E_4}}{E_1 E_3}\right) \\ c \cdot \left(\frac{\sqrt{E_1 E_3} - \sqrt{E_2 E_4}}{E_1 E_3}\right) \end{cases}$$
(23)

通常 *c* > Q<sup>-1</sup>;故应舍去上式中**的**前一解,后一 解变换后,得到

$$Q = 2\pi \cdot \frac{x_0}{\lambda} \cdot \left( \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{\sqrt{E_1 E_3} - \sqrt{E_2 E_4}} \right) \quad (24)$$

式(24)括弧内分式的物理意义为近声源通道能 量几何平均值对近声源通道能量几何平均值与 远声源通道能量几何平均值之差的比值。

实测信号能量包括放大倍数与真实信号的 乘积,参见式(16),(17),可表示为

$$E_{1} = BK_{1}^{2} \sum_{i=0}^{n} f_{1}^{2}(x_{1}, i\Delta t)$$

$$E_{2} = BK_{2}^{2} \sum_{i=0}^{n} f_{2}^{2}(x_{2}, i\Delta t)$$

$$E_{3} = BK_{2}^{2} \sum_{i=0}^{n} f_{2}^{2}(x_{3}, i\Delta t)$$

$$E_{4} = BK_{1}^{2} \sum_{i=0}^{n} f_{1}^{2}(x_{4}, i\Delta t)$$
(25)

式中*i*=0,1,2,...*n*,*n*为取样点数.将式(25) 代入式(24),所计算*Q*值已消除*K*<sub>1</sub>和*K*<sub>2</sub>影响.

• 13 •

这就是说,利用图 2 方法测试,利用式(24)计算 *Q*值,可放宽对仪器和换能器的制作要求.

### 四、误差分析

#### 1. 计算方法引起的误差

(α)式(7)引起的计算误差 Q值的基本定义为幅衰减到初始值的 1/lπ 所经历的 波长数,而其它定义则是由基本定义推导得出的.由式(8),根据Q值的基本定义,得到

 $\alpha Q\lambda = \pi \qquad (26)$ 

用  $\lambda$  代换式 (12) 中  $x_0$ ,并将  $a\lambda = \Delta E/2E_1$  代 人上式,可得到式 (7).以上讨论表明式 (7) 是 经过式 (11)近似后**的**导出定义.

由式(11)可知,仅有当 α 较小,即 Q 值较高时,式(7)才成立. 岩体的 Q 值多在 100 以下,因此利用式(7)计算 Q 值与其它方法相比有一定出入.

(b)式(13)引起的计算误差 式(13)是 由式(7)经过式(11)推导而得出的,因此当岩体 *Q*值较小时,式(13)会导致计算误差.

#### 2. 两换能器间距 x<sub>0</sub> 引起的误差

(a) 掉波引起的误差 当两换能器间距 \*0 过远时,受图 2 测量方法限制,远声源通道放



图 3 弱信号时的掉波现象 a----强信号; b-----弱信号. 粗实线为实际信号,双点划线为数字信号.

大倍数不能过高,否则另一方向测试时,信号 可能溢出单板机采样上限电平.图3有两组波

• 14 •

形, *a* 为强信号波形、*b* 为弱信号波形.从图中 可明显看出,信号再弱、掉波现象将出现,当信 号电平低于单板机 A/D 变换器的分辨 率 时, 单板机的输出结果均为零.这就是说,利用式 (24)计算 Q 值, *x*<sub>0</sub> 过大时,随 *x*<sub>0</sub> 增加,Q 值误 差增加,出现Q 值随 *x*<sub>0</sub> 线性增加的假象.

(b) 合理的 x<sub>0</sub>确定方法 现场实测时, 可将两探头涂上黄油贴在岩壁上,锤击发出信 号、调正两探头间距及仪器放大倍数,使探头间 距及放大倍数满足近声源通道信号不溢出,远 声源通道信号峰值不小于溢出幅值的 1/3.调 正完毕后,固定探头,

#### 3. 消除测量方法和计算方法引起的误差

在式(24)中,系采用全波列能量计算2值. 全波列包括直达波和后续波. 岩体对这两种组 份均有衰减作用,且受锤击地点、落锤速度、锤 头质量影响较大. 只要增加测量次数,取其平 均值,即可将该测量方法和计算方法引起的误 差控制在工程需要允许的范围内.

即使在同一岩种,某一矿山工程范围内,岩 体的宏观、微观结构仍有差异.因而即使在某 一地点测量无数次,其结果仍不能代表这一区 段岩体的Q值,必需在这区段内,选择若干测 点,取其结果的平均值作为该区段岩体的Q值.

实验次数、可疑数据的舍弃、数据处理方 法、以及数据处理后的标准差、置信概率等,在 统计学中早有论述.本文是按着格拉布斯方法 进行数据处理的<sup>63</sup>,每一地质区段取三个测点, 每一测点左右各测三~六次.

### 五、实测中的两个情况

#### 1. 换能器固定方法

将特制的换能器座用水泥水 玻 璃 (1:0.2) 或水泥速凝剂 (1:1) 固定在岩壁上.速凝剂为 红星 2<sup>#</sup>,固化时间大约 30min.待水泥有初期 强度后,将换能器旋入.

2. 式(25)中 x<sub>0</sub>/λ 的计算方法 由于波长

$$\lambda = T \cdot v = T \cdot x_0/t_0 \quad (27)$$

8 卷 4 期

式中 *T*——周期, *v*——声速, *t*<sub>0</sub>——声波传播 *x*<sub>0</sub>所需时间.由式(27)得到

 $x_0/\lambda = t_0/T = \bar{m} \Delta t / \bar{n} \Delta t = \bar{m} / \bar{n}$  (28) 式中:  $\bar{m}$ ——单板机输出信号中两组初至波的 初至点间取样点数的平均值.  $\bar{n}$ ——单板机输 出信号中表示主频周期取样 点 数 的 平 均 值.  $\Delta t$ ——单板机取样时间间隔.

### 六、实验结果

张家洼等矿的测量结果表明2值有良好重 复性,其重复率远高于声速测量结果.在声速 测量中,声波传播时间主要由接收波的初至点 确定.岩体衰减较大,初至波的幅值较小,甚至 可能掉波,各种声速测量仪器的分辨率不同、换 能器机电转换系数不同、各次测量时换能器耦 合条件不同,是造成声速测量重复性低的主要 源因.

岩体稳定性分类方法较多,但都不尽理想. 有的太复杂,一般矿山难以做到;有的相关性不 好. 声速法分类是其中一种,但重复性不理想, 从式(27)可知,在测量岩体 Q 值的同时,可获得 岩体声速. 根据张家洼等矿有限的测量资料与 已有的声速测量资料对比,在岩体稳定性分类 中,Q与v有一定的相关性,但要得到定量的结论,尚需做大量的工作.

在前言中已经谈到,从理论上讲, 2 值应与 岩体稳定程度有较大的相关性. 将张家洼等矿 巷道岩体稳性观察与已测得 2 值分析比较, 可 以认为岩体稳定程度确与 2 值相关, 但要得到 定量结论, 尚需做大量现场测量工作.

根据已测得资料初步测算,Q>15,属稳
定岩体;8<Q<15,属中等稳定岩体;Q<</li>
8,属不稳定岩体,以上结论仅供参考.

从文中分析可知,在理论上,利用式(24)计 算 2 值从声学角度看尚不严密。但现场实测的 重复率却较高,高于 80%。这说明理论不严密 造成的 2 值偏差不足以影响工程使用。

#### 参考文献

- [1] 高磊,《矿山岩体力学》,冶金工业出版社,北京,1978 年.
- [2] 何作镛、赵玉芳, 《声学理论基础》,国防工业出版社,北京, 1976.
- [3] D. H, 约翰斯顿等, 《衰减的实验室测量》, 《石油勘探 译丛》, No. 2, 1983.
- [4] 中国矿院数学教研室,《数学手册》,煤炭工业出版社, 北京,1976.
- [5] 张如一等,《实验应力分析》,机械工业出版社,北京, 1981.

## 超声 Doppler 血流信号自回归谱估计研究

肖 化 陈启敏 刘淑燕 (陕西师范大学声学所) 1988 年 9 月 7 日收到

本文讨论了自回归(AR)模型用于处理超声 Doppler 血流信号的情况。实验表明, AR 谱估计比" FFT 周期谱具有分辨率高,随机起伏误差小等优点。

一、引 言

利用超声 Doppler 血流信号的功率谱特征 来进行血管疾病的正确识别,关键在于能否得

应用声学

到较准确的信号谱.国内外通常采用的方法是 以 FFT 为基础的谱估计法,然而这种方法在 分析时采用了某种窗函数,假设窗函数之外的 数据延拓,使得到的谱估计是信号谱与窗函数 谱的卷积.这就使得它的频率分辨率低,且随

• 15 ·